Ueber

den physikalisch-optischen Bau

des

Rindsauges.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doctorwürde

der

philosophischen Facultät

der

Universität Rostock

vorgelegt

von

Paul Moennich.
Rostock.

Separat-Abdruck aus der „Zeitschrift für vergleichende Augenheilkunde".
Leipzig 1883.

Ueber

den physikalisch-optischen Bau

des

Rindsauges.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doctorwürde

der

philosophischen Facultät

der

Universität Rostock

vorgelegt

von

Paul Moennich.

Rostock.

Separat-Abdruck aus der „Zeitschrift für vergleichende Augenheilkunde".
Leipzig 1883.

Vereinzelte ophthalmometrische Untersuchungen über die Hornhaut und die geschichtete Krystalllinse des Rindsauges wurden schon von Chossat[1]) in den Jahren 1818 und 1819 veröffentlicht. Senff[2]) stellte später (1846) Messungen über das totale Brechungsvermögen der Ochsenlinse an. In neuester Zeit bestimmte Peschel[3]), zwecks seiner experimentellen Untersuchungen über die Periskopie der Krystalllinse, die Totalindices von einigen Rindslinsen sowie die centralen Krümmungsradien der Linsenoberflächen. Vor einigen Jahren hat Prof. L. Matthiessen[4]), neben einer Anzahl von Augen verschiedener Wirbelthiere, auch das Rindsauge ophthalmometrisch untersucht und zuerst dessen Cardinalpunkte berechnet.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit über das Rindsauge war, durch umfangreichere und eingehendere Messungen, als sie bis jetzt angestellt sind, vor Allem genauere Kenntnisse über den mathematischen Bau der Hornhautoberfläche zu gewinnen und das Gesetz über die Zunahme der Brechungsindices in der geschichteten Krystalllinse festzustellen.

1) Chossat, Mémoire sur la courbure des milieux réfringens de l'oeil chez le boeuf. Ann. de chim. et de phys. X. p. 337. — Derselbe, Extrait d'un mémoire sur le pouvoir réfringent des milieux de l'oeil. Ann. de chim. et de phys. VIII. p. 220.

2) Volkmann, Art. Sehen. Handwörterbuch der Physiol. III. 1. S. 290. — Aubert, Grundzüge der physiol. Optik. S. 410.

3) Peschel, Experimentelle Untersuchungen über die Periskopie der Krystalllinse. Pflüger's Archiv. XX. Bd. 1879. S. 338.

4) L. Matthiessen, Grundriss der Dioptrik geschichteter Linsensysteme. Leipzig 1877. S. 178. — Derselbe, Die Differentialgleichungen der Dioptrik der geschichteten Krystalllinse. Pflüger's Archiv. XIX. Bd. 1879. S. 548.

Die Indices der lichtbrechenden Medien des Rindsauges wurden mittelst eines von Zeiss in Jena angefertigten grossen Abbeschen Refractometers gemessen. Die Werthe, welche das Instrument liefert, beziehen sich auf die Fraunhofer'sche Linie D. Zur Bestimmung der Oerter der brechenden Flächen und der Retina benutzten wir gefrorene Augen. Die Krümmungs- und Dickenverhältnisse der Cornea und der Linse wurden mit Hülfe einer neuen eigenen Methode untersucht, da ein Helmholtz-sches Ophthalmometer nicht zu unserer Verfügung stand und die Methoden von Chossat [1]), Petit [2]) u. A. zu exacteren Messungen nicht geeignet sind. Diese äusserst einfache Methode, welche in der Anwendung von Gypsabgüssen der zu messenden Objecte besteht und welche vor Allem eine sehr genaue Bestimmung der Krümmungs- und Dickenverhältnisse der Cornea gestattet, hat die schon von Chossat gemachte Entdeckung der ellipsoidischen Form der Hornhautoberfläche vollkommen bestätigt.

Zu den sämmtlichen Messungen wurden möglichst frische enucleirte Bulbi von mehrjährigen Rindern benutzt. Genauere Angaben über das Alter der Thiere konnten leider nicht eruirt werden. Einige Augen wurden schon circa eine Stunde nach dem Tode des geschlachteten Rindes untersucht.

Obgleich unsere Methode auch angewandt werden konnte zur Messung der Krümmungsverhältnisse der Cornea und der vorderen Linsenfläche, so lange der Augapfel sich noch im Kopfe des getödteten Thieres befand, so wurde doch hiervon Abstand genommen, weil es noch an Mitteln fehlt, welche auch die genaue Bestimmung der übrigen Dimensionen des Bulbus in situ gestatten.

Bevor wir zu den Resultaten der Untersuchungen übergehen, wollen wir eine genaue Angabe unserer Methode, welche sich an die Chossat'sche anlehnt, vorausschicken.

I. Methode der Messungen.

a) Die äussere Form der Cornea.

Zur Bestimmung der äusseren Hornhautkrümmung wurde das noch ganz straffe enucleirte Auge, nach sorgfältiger Entfer-

1) Chossat, Mémoire sur la courbure des milieux réfringens de l'oeil chez le boeuf. Ann. de chim. et de phys. X. p. 337. — Chossat benutzte zu seinen Messungen vergrösserte Zeichnungen von Hornhautmeridianen. Diese verschaffte er sich, indem er enucleirte Bulbi mittelst eines Megaskops auf eine Ebene projicirte und die Contouren der Cornea mit einem Bleistift nachzeichnete. 2) Acad. des Scienc. 1728.

nung aller noch etwa anhaftenden Conjunctiva-, Muskel- und Fetttheile, seine Axe in verticaler Richtung, auf eine Unterlage feinen trockenen Sandes gelegt. Dieser befand sich in einer flachen, runden Cartonschachtel, deren Durchmesser circa 10 Cm. betrug. Der Bulbus lag etwa zur Hälfte im Sande. Hierauf wurde in eine quadratförmige Cartonplatte von ungefähr 7 Cm. Seitenlänge ein nahezu kreisförmiges Loch geschnitten. Diese Oeffnung war so gross, dass die Cartonplatte, wenn sie horizontal über das Auge gelegt war, von der tiefstgelegenen Stelle des Hornhautfalzes zum Mindesten um 4 Mm. überragt wurde. Sorgfältig musste darauf gesehen werden, dass der Rand der Oeffnung sich ringsherum lose und gleichförmig an die Sclerotica anschmiegte, um jede Deformation der Hornhautoberfläche durch ungleichmässigen Druck zu vermeiden. War die Berührung an allen Stellen zufriedenstellend befunden, so wurde die Cartonplatte durch an den Seiten untergeschobene kleine Holzkeile in dieser Lage fixirt. Zur besseren Markirung des Hornhautfalzes, welcher an den Gypsabgüssen nur schwierig zu erkennen war, wurden auf dem Rande der Sclerotica vier kleine Cartonplättchen, 2 Mm. breit und 6 Mm. lang, mit Gummi arabicum befestigt. Dies geschah an den Stellen, wo der Hornhautfalz von dem verticalen und horizontalen Meridian des Auges geschnitten wird. Aus einem etwa 2 Cm. breiten und 16 Cm. langen Streifen dünnen Cartonpapiers wurde nun durch Zusammenkleben der Enden ein Ring verfertigt, dessen Durchmesser nahezu 5 Cm. betrug. Dieser Ring wurde dann so auf die Cartonplatte gestellt, dass die Cornea sich möglichst in dessen Mitte befand, und mit etwas Wachs befestigt. Die so gebildete Form konnte nun mit einem dickflüssigen Brei aus gebranntem Gyps und Wasser angefüllt werden. Das Ganze blieb so lange ruhig stehen, bis die hinreichend erstarrte Masse vorsichtig von dem Auge getrennt werden konnte. Von dieser Hohlform, welche wir den primären Abguss nennen wollen und welche den genauen Abdruck der Hornhautoberfläche enthielt, wurden wiederum zwei Abgüsse (secundäre) genommen, von denen der eine zum Messen des horizontalen, der andere zur Bestimmung des verticalen Meridians der Cornea diente. Bevor aber dies geschehen konnte, musste die primäre Form weiter hergerichtet werden. Die Cartonplättchen zur Markirung des Hornhautfalzes hatten sich von der Sclerotica losgetrennt und sassen im Gypsabgusse fest. Sie wurden mit der Pincette entfernt und ihre Lagerstellen mit einem spitzen

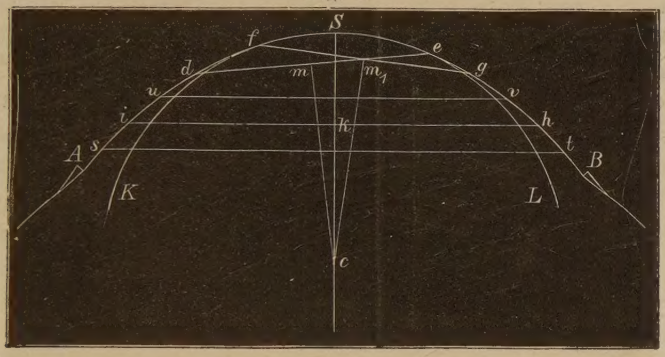
scharfen Messer sorgfältig etwas vertieft. Jetzt wurde die Form mit einem weichen, in Oel getauchten Pinsel vorsichtig eingerieben und dann mit flüssiger Gypsmasse angefüllt. Nachdem diese erhärtet, konnte der secundäre Abguss, welcher nunmehr die Oberfläche der Cornea in ihrer ursprünglichen convexen Gestalt wiedergab und den Hornhautfalz durch Erhöhungen sichtbar machte, aus der Form herausgenommen werden. Dieses Loslösen machte oft Schwierigkeiten, sobald die hineingegossene Gypsmasse sich zu sehr erhärtet hatte. War solches der Fall, so leistete häufig ein vorsichtiges Erwärmen der Form in der Flamme einer Weingeistlampe gute Dienste. Nachdem auf dieselbe Weise ein zweiter secundärer Abguss genommen, wurden beide mit einer dünnen Uhrfedersäge durchsägt, der eine in der Richtung des horizontalen, der andere in der Richtung des verticalen Meridians. Zur Erzielung scharfer Abgrenzungslinien mussten die Schnittflächen mittelst einer breiten feinen Feile und eines scharfen Messers glatt geputzt werden. Weil auf diese Weise ein wenig Gypsmasse verloren ging, so durfte der Schnitt mit der Säge nicht genau in den Meridian der Cornea fallen, sondern musste etwas seitwärts geführt werden. Ein derartiges Präparat wurde nun mit der Schnittfläche auf eine Glasplatte geklebt, auf welcher als Maassstab ein genau 2 Cm. langer und circa 3 Mm. breiter Papierstreifen mit Gummi arabicum bereits befestigt war. Die so hergerichtete Glasplatte wurde hierauf in ein Skioptikon gebracht. Dieses projicirte das Bild des Meridionalschnittes der Cornea äusserst scharf auf einen senkrecht stehenden Schirm. Der Schirm bestand aus einem Zeichnenbrett, welches einen Bogen weissen Papiers in einer Ebene straff gespannt erhielt. Der Apparat wurde so eingestellt, dass die Projection des auf der Glasplatte befestigten 2 Cm. langen Papierstreifens genau 20 Cm. mass, das zu messende Object also in zehnfacher Linearvergrösserung erschien. Um jede Verzeichnung des Bildes möglichst zu vermeiden, waren auf die Glasplatte mit einem Schreibdiamant zwei Systeme feiner Parallellinien geritzt, welche einander senkrecht durchschnitten. Auf diese Weise wurde eine Menge Rechtecke gebildet. Sobald nun durch Messungen mit einem Cirkel festgestellt war, dass die Projectionen dieser Rechtecke keine messbare Verzerrung mehr zeigten, wurde das Bild des Hornhautmeridionalschnittes mit einem harten, scharf zugespitzten Bleistift äusserst sorgfältig nachgezeichnet. An der so erhaltenen Curve konnten nun vermittelst Cirkel und Lineal

Messungen mit grosser Genauigkeit angestellt werden, da in Folge der zehnfachen Vergrösserung des Meridionalschnittes etwaige Messungsfehler sich auf den zehnten Theil ihrer wahren Grösse reducirten.

Die Messungen wurden in folgender Weise ausgeführt:

In Fig. 1 sei ASB das Bild eines horizontalen Meridionalschnittes der Hornhautoberfläche in bedeutend kleinerem Maassstabe, als es zu den folgenden Messungen benutzt wurde. Bei A und B liegen die Orte des Hornhautfalzes. Die hervorstehenden Ecken bei A und B sind durch die Cartonplättchen entstanden, welche auf die Sclerotica des Auges behufs besserer Markirung des Hornhautfalzes geklebt waren (siehe S. 3).

Fig. 1.

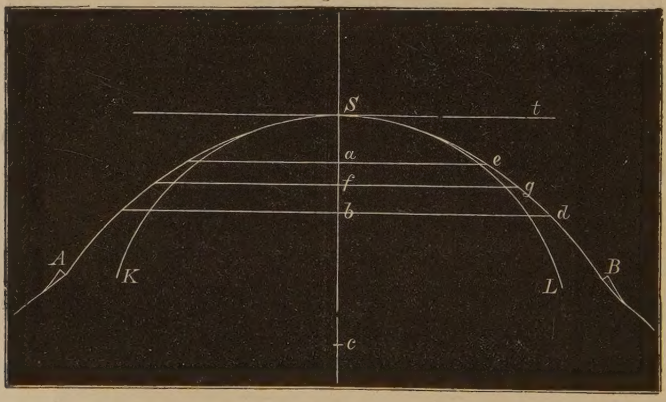


Auf Grund der Beobachtungen von Chossat[1]), nach welchen die Hornhautoberfläche des Rindsauges ein Segment eines Rotationsellipsoides ist, wurde die zu untersuchende Curve von vornherein als Ellipse angesehen. Wir beschränkten uns in Folge dessen darauf, die Curve durch sorgfältige Messungen auf den Grad ihrer Ellipticität hin zu prüfen. Die erste Aufgabe war, die Richtung der grossen Axe der vermeintlichen Ellipse, also die Lage einer geraden Linie, zu deren beiden Seiten die Curve symmetrisch verlief, möglichst genau festzustellen. Zu dem Zwecke musste zunächst der Krümmungskreis im Scheitel S der Cure ASB durch geometrische Construction bestimmt werden, was allerdings nur mit annähernder Genauigkeit geschehen konnte. In der Nähe des Scheitels S der Curve wurden zwei

1) Chossat, Mémoire sur la courbure des milieux réfringens de l'oeil chez le boeuf. Ann. de chim. et de phys. X. p. 337.

sich einander schneidende Sehnen de und fg gezogen und in ihren Mittelpunkten m und m_1 Senkrechte mc und m_1c errichtet. Der Schnittpunkt c dieser Lothe traf ungefähr mit dem Mittelpunkte des gesuchten Berührungskreises KSL zusammen. Nachdem nun auf der Curve ASB, etwa 45° vom vermeintlichen Scheitelpunkte S entfernt, zwei Punkte i und h gesucht waren, welche beide gleichen Abstand vom Mittelpunkte c des Krümmungskreises KSL hatten, wurden sie durch eine gerade Linie ikh verbunden. Die in dem Mittelpunkt k dieser Geraden errichtete Senkrechte Sc musste, wie leicht einzusehen, annähernd in die Richtung der Axe der Curve ASB fallen, wenn diese eine symmetrische war. Dies konnte jetzt leicht festgestellt werden, wenn man zu der Linie ih mehrere Parallellinien (etwa st, uv etc.) zog und durch Messungen untersuchte, ob ihre durch die Curve ASB begrenzten Strecken durch die Axe Sc halbirt wurden. Wenn dies stets der Fall, so musste die Curve eine symmetrische und die Lage der Axe richtig bestimmt sein. Bei allen von uns untersuchten Hornhautmeridianen war eine nahezu vollständige Symmetrie vorhanden. Wenn auch die Lage der Axe nicht immer gleich anfangs correct bestimmt wurde, so war es doch leicht möglich, dieselbe par tâtonnement hinreichend genau zu finden.

Fig. 2.



Auf Grund der richtig fixirten Axenlage konnte nun folgendermaassen weiter verfahren werden (Fig. 2). Der Punkt S wurde als Anfangspunkt eines rechtwinkeligen Coordinatensystems betrachtet, dessen positive Axen in die Richtungen der Linien Sc und St fielen. Die x-Axe coincidirte mit der Axe Sc, die y-Axe mit der Geraden St.

Die allgemeine Gleichung der Ellipse für rechtwinkelige Coordinaten auf den Scheitel S bezogen, wenn Sc die Richtung der grossen Axe, ist:

$$y = \frac{b}{a}\sqrt{2ax - x^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

worin a die grosse, b die kleine Halbaxe bezeichnet. Da in dieser Formel nur a und b constant, so wird eine Ellipse vollständig gegeben sein, wenn man für a und b bestimmte Werthe substituirt. Um die Grössen a und b für unseren Fall zu finden, wurden nun zwei beliebige Abscissen $Sa = x_1$ und $Sb = x_2$ angenommen und ihre Längen sowohl, als auch die der zugehörigen Ordinaten $ae = y_1$ und $bd = y_2$ möglichst genau gemessen. Setzte man nun nach einander zwei zusammengehörige Werthe der Coordinaten in die allgemeine Gleichung (1) ein, so resultirten zwei Ausdrücke, welche nur a und b als Unbekannte enthielten. Aus diesen beiden Gleichungen konnten nun leicht die beiden Halbaxen a und b berechnet werden, die einer Ellipse entsprachen, welche durch die Punkte S, e und d ging und deren grosse Axe mit der Richtung Sc coincidirte. Nun war zu beweisen, dass die ganze Curve ASB mit dieser Ellipse zusammenfiel. Zu dem Zwecke wurde eine beliebige Abscisse $Sf = x_3$ gemessen und vermittelst dieser aus der Gleichung unserer Ellipse die zugehörige Ordinate berechnet. War diese gleich der gemessenen Linie fg gefunden, so musste auch der Punkt g auf dem Bogen der Ellipse liegen. Dieselbe Operation wurde nun mit mehreren anderen Abscissen wiederholt und auf diese Weise constatirt, ob alle berechneten mit den zugehörigen gemessenen Ordinaten in ihren Grössen übereinstimmten. War dies meistens auch nur bis auf unbedeutende Differenzen hin der Fall, so konnte doch mit einer für unsere Zwecke genügenden Sicherheit auf eine nahezu vollständige Coincidenz unserer Curve mit einer Ellipse geschlossen werden.

Hatte man auf diese Weise die mathematische Form eines Meridians der Hornhautoberfläche bestimmt, so konnte der Krümmungsradius ϱ für den Scheitel der Ellipse aus folgender Gleichung (4), genauer als durch geometrische Construction, durch einfache Rechnung gefunden werden. Die Mittelpunktsgleichung der Ellipse für rechtwinkelige Coordinaten ist:

$$y = \frac{b}{a}\sqrt{a^2 - x^2}$$

Diese Gleichung auf x reducirt, gibt:

$$x = \frac{a}{b}\sqrt{b^2 - y^2}$$

Differentiiren wir nun nach y, so folgt:

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{ay}{b(b^2 - y^2)^{1/2}} \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Der zweite Differentialquotient würde sein:

$$\frac{d^2x}{dy^2} = -\frac{ab}{(b^2 - y^2)^{3/2}} \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

Die allgemeine Gleichung für den Krümmungsradius lautet:

$$\varrho = \frac{(1 + p^2)^{3/2}}{q}$$

worin p den ersten, q den zweiten Differentialquotienten bezeichnet. Substituirt man nun die Ausdrücke aus (2) und (3) in diese Formel, so resultirt die allgemeine Gleichung für den Krümmungsradius der Ellipse:

$$\varrho = \frac{[b^4 + y^2(a^2 - b^2)]^{3/2}}{a\,b^4}$$

Setzt man hierin $y = o$, so erhält man den Krümmungsradius für den Scheitel S der Ellipse:

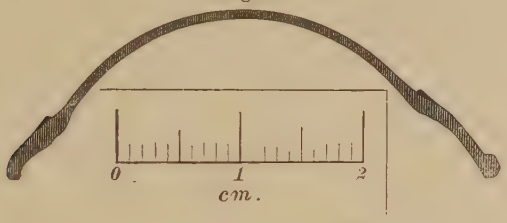
$$\varrho = \frac{b^2}{a} \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

b) Die Dicke der Hornhaut.

Zur Messung der Dicke der Cornea wurde das Auge anfangs ebenso behandelt, wie wir es im vorigen Abschnitt (*a*) gesehen haben, nur blieb in diesem Falle der primäre Abguss auf der Hornhaut befestigt. Das Auge wurde nach hinreichender Erstarrung der Gypsmischung vorsichtig aus dem Sande herausgenommen und umgedreht, so dass jetzt der Bulbus mit der Cornea nach unten auf der Gypsform ruhte. Darauf wurde mit einem sehr scharfen Messer die Sclerotica ringsherum unmittelbar über der Cartonplatte durchschnitten und dann der abgeschnittene Theil des Bulbus sammt dem Glaskörper so vorsichtig entfernt, dass die Cornea mit ihrer Oberfläche fest an der Gypsmasse haften blieb. Nachdem nun die Cartonplatte von der Form abgenommen und Linse und Iris mit äusserster Sorgfalt losgetrennt waren, wurde der blossgelegte innere Hohlraum der Cornea mit einem weichen Pinsel ausgetrocknet und dann mit Gypsmasse angefüllt. Die Mischung musste in hinreichender Menge angewandt werden, damit sie über den Rand der Sclerotica hinaus-

treten und sich mit der primären Gypsmasse vereinigen konnte. Um ein Ueberfliessen des Breies zu vermeiden, war die Form mit einem circa 2 Cm. hohen Rande aus Cartonpapier umgeben. Nachdem nun die Mischung erstarrt, konnte das Ganze annähernd in der Richtung eines Meridians der Cornea, dessen Lage vorher markirt war, mit einer feinen Uhrfedersäge durchsägt werden. Eine der Hälften dieses Präparates wurde jetzt auseinander gebrochen und die Hornhaut entfernt. Der Bruch musste an der Stelle eintreten, wo die zuletzt angewandte Gypsmasse die primäre berührte. Bei einiger Aufmerksamkeit konnten nun die beiden Bruchstücke, wie sie ursprünglich gelegen, genau wieder aneinander gepasst werden. Den festen Zusammenhalt bewerkstelligte man vermittelst eines mit Siegellack bestrichenen Cartonpapierstreifens. Nachdem dann die Schnittfläche des Präparates mit Messer und Feile glatt geputzt war, wurde der Hohlraum, den die Hornhaut gebildet, mit gefärbtem geschmolzenem Wachs ausgefüllt. Der überstehende Rand der Wachsmasse musste mit einem Messer entfernt werden.

Fig. 3.



Ein derartiges Präparat, welches das Bild eines horizontalen Hornhautmeridionalschnittes darstellt, und an welchem die Dicke der Cornea mit Hülfe eines Glasmikrometers direct gemessen wurde, ist auf Fig. 3 in etwas vergrössertem Maasse wiedergegeben. Der unter der Hornhaut sichtbare, in gleicher Weise vergrösserte Maassstab gibt einen Anhalt für die wahre Grösse des Objectes.

c) Die äussere Form der Linse.

Zur Messung der Oberflächenkrümmungen der Linse wurden ebenfalls Gypsabgüsse angewandt. Die Linse wurde, nachdem sie sorgfältig aus dem Augapfel herauspräparirt und von allen anhaftenden Glaskörpertheilen mittelst eines weichen Pinsels be-

freit war, äusserst vorsichtig in Gyps eingegossen. Zu diesem Zwecke wurde aus einem Cartonstreifen ein Ring von ungefähr 3 Cm. Durchmesser und 2,5 Cm. Höhe angefertigt. Dieser Ring musste an der einen Seite durch eine Cartonplatte verschlossen werden, so dass das Ganze die Form einer kleinen Schachtel erhielt. Nachdem dieser Behälter zur Hälfte mit Gypsbrei gefüllt und die Linse, ihre Axe in verticaler Richtung, auf die Oberfläche der noch flüssigen Mischung gelegt war, wurde der noch übrige Hohlraum der Cartonschachtel mit Gypsmischung ausgegossen, so dass die Linse ganz in der Masse eingeschlossen lag. Sobald das Präparat hinreichende Festigkeit erlangt hatte, konnte es parallel zur Axe der Krystalllinse durchsägt werden. Der Schnitt musste wenigstens 1 Mm. seitwärts von der Axe geführt werden, um bei weiterer Bearbeitung des Objectes den zu messenden Meridian der Linse genau treffen zu können. Von den beiden Theilen des Präparates konnte selbstverständlich nur derjenige weiter verwandt werden, welcher den grösseren Abschnitt der Linse enthielt. Das Linsenstück wurde mit einer Pincette entfernt und hierauf der Hohlraum mit Gypsbrei angefüllt. Sobald die Masse erstarrt war, konnte man die Form zerbrechen. Auf diese Weise erhielt man von der Krystalllinse eine getreue Copie aus Gyps, an welcher von der Schnittfläche mit einem Messer leicht so viel Masse entfernt werden konnte, bis der Schnitt ziemlich genau in einen Meridian fiel. Von dem so erhaltenen Objecte wurden nun vermittelst des Skioptikons zwecks der Messung in derselben Weise vergrösserte Bilder hergestellt, wie wir oben (s. S. 4) an secundären Hornhautabgüssen gezeigt haben.

Von der vorderen Krümmungsfläche der Linse konnten auch Abgüsse genommen werden, so lange die Linse sich noch im Augapfel befand. Zu diesem Zwecke musste man die Oberfläche der Krystalllinse durch Entfernung der Cornea und der Iris mittelst Pincette und Scheere blosslegen. Der entstandene Hohlraum wurde mit einem äusserst weichen Pinsel ausgetrocknet und dann mit Gypsmasse angefüllt. Der so erhaltene Abdruck von der Linsenoberfläche konnte nun auf dieselbe Weise wie die primären Hornhautabgüsse zwecks der Messung weiter behandelt werden.

II. Resultate der Messungen an Gypspräparaten.

a) Die Cornea.

Zu Messungen der Krümmungsverhältnisse der Hornhaut dienten im Ganzen 9 Bulbi. Von jedem Thiere wurde nur ein Auge verwandt. Das Auge Nr. 1 gehörte einem jüngeren Rinde an, die übrigen 8 stammten von mehrjährigen Individuen.

Im Folgenden bedeuten a die grosse, b die kleine Halbaxe des eine Ellipse bildenden Meridionalschnittes der Cornea und ϱ deren Krümmungsradius im Scheitel S (Fig. 2). Sämmtliche x bezeichnen auf der grossen Axe vom Scheitel S aus abgetragene Abscissen und die resp. y die zugehörigen Ordinaten.

Fünf horizontale Meridionalschnitte wurden auf ihre Ellipticität hin geprüft (s. S. 7), die Maasse der Abscissen und der zugehörigen Ordinaten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 1.

Auge	Abscissen	Ordinaten
I	$x_1 = 1$ Mm. $x_2 = 3{,}5$ "	$y_1 = 5{,}05$ Mm. $y_2 = 9{,}17$ "
II	$x_1 = 1$ " $x_2 = 5$ "	$y_1 = 5{,}27$ " $y_2 = 11{,}50$ "
III	$x_1 = 1$ " $x_2 = 5$ "	$y_1 = 5{,}55$ " $y_2 = 11{,}75$ "
IV	$x_1 = 1$ " $x_2 = 5$ "	$y_1 = 5{,}45$ " $y_2 = 11{,}57$ "
V	$x_1 = 1$ " $x_2 = 5$ "	$y_1 = 5{,}60$ " $y_2 = 11{,}90$ "

Aus diesen Daten ergab sich durch Rechnung:

Tabelle 2.

Auge	Grosse Halbaxe a	Kleine Halbaxe b	Krümmungsradius ϱ
I	22,075 Mm.	16,970 Mm.	13,046 Mm.
II	42,500 "	24,438 "	14,052 "
III	19,816 "	17,695 "	15,800 "
IV	20,773 "	17,780 "	15,218 "
V	21,148 "	18,429 "	16,060 "

Die Messungen und Rechnungen zur Feststellung, ob die zu untersuchenden Curven mit diesen Ellipsen coincidirten, fielen folgendermaassen aus:

Tabelle 3.

Auge	Abscissen gemessen	Ordinaten berechnet	Ordinaten gemessen
I	$x_3 = 0{,}5$ Mm.	$y_3 = 3{,}591$ Mm.	3,60 Mm.
	$x_4 = 2$ "	$y_4 = 7{,}058$ "	7,05 "
	$x_5 = 5$ "	$y_5 = 10{,}756$ "	10,75 "
	$x_6 = 8$ "	$y_6 = 13{,}074$ "	13,05 "
II	$x_3 = 3$ "	$y_3 = 9{,}018$ "	9,00 "
	$x_4 = 7$ "	$y_4 = 13{,}436$ "	13,41 "
III	$x_3 = 3$ "	$y_3 = 9{,}361$ "	9,34 "
	$x_4 = 6$ "	$y_4 = 12{,}684$ "	12,70 "
IV	$x_3 = 3$ "	$y_3 = 9{,}204$ "	9,18 "
	$x_4 = 6$ "	$y_4 = 12{,}500$ "	12,55 "
V	$x_3 = 3$ "	$y_3 = 9{,}461$ "	9,44 "
	$x_4 = 6$ "	$y_4 = 12{,}852$ "	12,89 "

Da aus dieser Tabelle ersichtlich, dass die berechneten und gemessenen Ordinaten bis auf geringe Differenzen hin in ihren Grössen übereinstimmten, so wird man im Allgemeinen den horizontalen Meridionalschnitt der Cornea des Rindsauges als elliptisch ansehen dürfen.

Die Verticalmeridiane zeigten ihre Uebereinstimmung mit einer Ellipse in demselben Grade. Sie wurden an drei Augen mit den zugehörigen Horizontalmeridianen verglichen. Die Bilder beider Curven liessen sich immer fast vollständig zur Deckung bringen. Die Maasse der Coordinatenpaare waren folgende:

Tabelle 4.

Auge	Horizontalmeridian		Verticalmeridian	
	Abscissen	Ordinaten	Abscissen	Ordinaten
IV	$x_1 = 1$ Mm.	$y_1 = 5{,}45$ Mm.	$x_1 = 1$ Mm.	$y_1 = 5{,}44$ Mm.
	$x_2 = 5$ "	$y_2 = 11{,}57$ "	$x_2 = 5$ "	$y_2 = 11{,}55$ "
VI	$x_1 = 1$ "	$y_1 = 5{,}25$ "	$x_1 = 1$ "	$y_1 = 5{,}22$ "
	$x_2 = 5$ "	$y_2 = 11{,}05$ "	$x_2 = 5$ "	$y_2 = 10{,}95$ "
VII	$x_1 = 1$ "	$y_1 = 5{,}25$ "	$x_1 = 1$ "	$y_1 = 5{,}25$ "
	$x_2 = 5$ "	$y_2 = 11{,}12$ "	$x_2 = 5$ "	$y_2 = 11{,}15$ "

Hieraus ergab sich durch Rechnung:

Tabelle 5.

Auge	Horizontalmeridian			Verticalmeridian			Differenz
	a	b	ϱ	a_1	b_1	ϱ_1	$\varrho - \varrho_1$
	Mm.	Mm.	Mm.	Mm.	Mm.	Mm.	Mm.
IV	20,773	17,780	15,218	20,815	17,765	15,161	0,057
VI	18,040	15,990	14,174	17,174	15,524	14,033	0,141
VII	19,967	16,800	14,136	20,934	17,192	14,119	0,017
Mittel	19,593	16,856	14,509	19,641	16,827	14,438	0,071

Diese Tabelle ergibt im Mittel eine nur geringe Differenz zwischen dem horizontalen und verticalen Meridian. Der Krümmungsradius im Scheitel der Hornhaut ist für den verticalen Meridian im Mittel nur 0,071 Mm. kleiner, als für den horizontalen. Wolfskehl[1]) hat an 11 Kalbsaugen Hornhautmessungen angestellt und eine grössere durchschnittliche Krümmungsdifferenz nachgewiesen. Er fand für den horizontalen Krümmungsradius in der Mitte der Cornea 11,578 Mm., für den verticalen 11,188 Mm., also eine Differenz von 0,390 Mm. Es scheint demnach die Hornhautasymmetrie bei den Rindern mit dem Alter abzunehmen.

Obgleich wir nur Horizontal- und Verticalmeridiane mit einander verglichen, so glauben wir doch, gestützt auf die geringe Asymmetrie, welche unsere Messungen ergaben, und auf Grund der Untersuchungen von Wolfskehl[2]), welcher an Kalbsaugen nachgewiesen hat, dass die grössten Krümmungsdifferenzen zwischen dem verticalen und horizontalen Meridian bestehen, mit völliger Gewissheit die Richtigkeit der Chossat'schen Beobachtungen annehmen zu dürfen, nach welchen die normale Hornhautoberfläche des Rindsauges ein Segment eines oblongen Rotationsellipsoides bildet.

Für das menschliche Auge wurde die Ellipticität der Hornhautoberfläche bereits durch mehrfache Untersuchungen von Senff, v. Helmholtz, Knapp, Woinow und Adamük unzweifelhaft nachgewiesen.[3]) Die dioptrische Bedeutung dieser ellipsoidischen Form ist auf mathematischem Wege von L. Matthiessen[4]) fest-

1) Wolfskehl, Ueber Astigmatismus in Thieraugen und die Bedeutung der spaltförmigen Pupille. Zeitschrift f. vergl. Augenheilk. 1882. S. 10.

2) Ebenda S. 10—11.

3) Vergl. L. Matthiessen, Grundriss der Dioptrik geschichteter Linsensysteme. Leipzig 1877. §. 58. — Aubert, Physiol. Optik. Leipzig 1876. § 4.

4) L. Matthiessen, Aplanatismus der Hornhaut. Archiv f. Ophthal. XXII. Bd. 1876. — Derselbe, Grundriss der Dioptrik etc. — Derselbe,

gestellt, welcher zeigte, dass die Hornhautoberfläche aplanatisch sei für Objecte in der Entfernung des deutlichen Sehens, und dass alle in einen Meridionalschnitt einfallenden Lichtstrahlen, welche homocentrisch gebrochen werden, sich in dem Brennpunkte der Ellipse schneiden und zugleich das Kerncentrum der Krystalllinse passiren.

Fig. 4.

Die grosse Axe jener Ellipse, durch deren Rotation die Hornhautoberfläche entstanden gedacht werden kann, fällt nun beim Rindsauge, wie bereits Chossat[1]) nachgewiesen hat, nicht mit der Augenaxe zusammen, sondern bildet mit dieser in der horizontalen Meridianebene einen kleinen Winkel (v)[2]), welcher, von der Augenaxe aus gerechnet, an der Nasalseite des Bulbus liegt.

Die Differentialgleichungen d. Dioptrik der geschichteten Krystalllinse. Pflüger's Archiv. XIX. Bd.

1) Chossat, Sur la courbure des milieux réfringens etc.

2) Dieser Umstand musste bei der Anfertigung verticaler Hornhautmeridionalschnitte berücksichtigt werden. Es durfte deswegen der Verticalschnitt durch einen secundären Gypsabguss nicht mit der Augenaxe zusammenfallen, sondern musste durch die grosse Axe der horizontalen Ellipse gelegt werden, was allerdings nur approximativ geschehen konnte.

Als Augenaxe wurde diejenige Gerade angesehen, die im Horizontalmeridian im Mittelpunkte jener Sehne senkrecht steht, welche die Hornhautfalzpunkte verbindet.

Wenn in Fig. 4 ASB ein horizontaler Meridionalschnitt, Scg dessen Axe, AB die Sehne, welche die Hornhautfalzpunkte verbindet, dmg die im Mittelpunkte m der Sehne AB errichtete Senkrechte bezeichnen und B an der Nasalseite des Auges liegt, so ist $\sphericalangle Sgd = \sphericalangle v$. Ob die Axe Sg mit der Gesichtslinie coincidirt, muss vorläufig dahingestellt bleiben, da an Thieraugen gegenwärtig noch jegliche Anhaltspunkte für die Lage der Gesichtslinie fehlen.

Der Winkel v wurde an sieben Augen bestimmt und im Mittel gleich $2^0\,52'\,38''$ gefunden. Die Einzelmessungen haben wir in Tabelle 6 zusammengestellt, in welcher zugleich die Maasse der horizontalen (s) und verticalen (s_1) Sehnen, welche in den Meridianebenen die Hornhautfalzpunkte verbinden, angegeben sind. Chossat fand für den Winkel v viel zu grosse Werthe, welche zwischen 9^0 und 10^0 variiren.

Tabelle 6.

Auge	s	s_1	Winkel v
	Mm.	Mm.	
II	27,5	22,4	—
III	—	—	$3^0\,13'$
IV	29,5	23,0	$2^0\,43'$
V	29,5	—	$2^0\,8'$
VI	29,6	22,8	$3^0\,30{,}5'$
VII	29,5	23,5	$2^0\,32'$
VIII	—	—	$2^0\,40'$
IX	29,5	23,9	$3^0\,22'$
Mittel	29,18	23,12	$2^0\,52'\,38''$

In der Tabelle 7 findet man die Werthe zusammengestellt, welche sich aus sämmtlichen Messungen an horizontalen Meridionalschnitten für $a, b, \frac{a}{b}$ und ϱ ergaben. Nur das Auge I wurde fortgelassen, weil es von einem jüngeren Rinde stammte.

Wir haben zum Vergleich aus den Axenverhältnissen, welche Chossat angegeben hat, den mittleren Krümmungsradius berechnet und $\varrho = 15{,}32$ Mm. gefunden. Auffallend ist, dass bei No. 2, verglichen mit den übrigen Augen, so abnorme Axenmaasse auftreten, welche aber doch wieder ein derartiges Verhältniss zu einander haben, dass der Krümmungsradius in der Mitte der Cornea verhältnissmässig nur wenig von der Durchschnittsgrösse abweicht.

Aus der folgenden Tabelle 7 ergibt sich als mittleres Axenverhältniss $\frac{a}{b} = 1{,}225$. Für den horizontalen Hornhautmeridian des menschlichen Auges wurde von Senff, v. Helmholtz und Knapp dieses Verhältniss gleich 1,198 gefunden.[1]) Fünfzehn andere Messungen von Woinow und Knapp ergaben im Mittel $\frac{a}{b} = 1{,}191$. Diese beiden Zahlen differiren nur um Weniges von dem von uns gefundenen Axenverhältniss. Daraus ergibt sich, dass die Hornhautoberflächen des menschlichen und des Rindsauges einander nahezu ähnliche oblonge Rotationsellipsoide bilden.

Tabelle 7.

Auge	a	b	$\frac{a}{b}$	ϱ
	Mm.	Mm.	Mm.	Mm.
II	42,500	24,438	1,739	14,052
III	19,816	17,695	1,120	15,800
IV	20,773	17,780	1,168	15,218
V	21,148	18,429	1,147	16,060
VI	18,047	15,993	1,128	14,173
VII	19,967	16,800	1,188	14,136
VIII	20,810	18,320	1,136	16,128
IX	22,020	18,712	1,176	15,901
Mittel	23,135	18,521	1,225	15,183

Die Dicke der Hornhaut wurde an drei Augen gemessen, und zwar direct (siehe S. 9) an den Gypspräparaten mit Hülfe einer Loupe und eines Glasmikrometers. Die Resultate waren folgende:

Tabelle 8.

Auge	Dicke der Cornea
	Mm.
V	0,85
VI	0,87
VII	0,88
Mittel	0,866

Die Hornhaut zeigte fast in ihrer ganzen Ausdehnung dieselbe Dicke, nur gegen den Rand hin trat eine schwache Verstärkung ein, wie an der nach einer Photographie hergestellten Copie eines Hornhautpräparates auf Fig. 3 ersichtlich. Weitere genauere Mes-

1) Vergl. L. Matthiessen, Grundriss der Dioptrik etc. S. 226.

sungen wurden nicht angestellt, da sie von nur geringem ophthalmometrischen Werthe erschienen.

b) Die Linsenoberfläche.

Die Krümmungsverhältnisse der Linsenoberfläche wurden an sechs verschiedenen Objecten gemessen. Diejenigen Präparate, welche wir von der vorderen Fläche angefertigt hatten, so lange die Linse sich noch im Bulbus befand, zeigten bis zum Rande hin eine vollkommene kugelförmige Gestalt, während die von herauspräparirten Linsen genommenen Abgüsse nach dem Rande zu eine stärkere Krümmung als im Scheitel erkennen liessen. Den Meridian der hinteren Fläche fanden wir bei allen Linsen, ebenso wie Matthiessen [1]), genau kreisförmig. Sämmtliche untersuchten Präparate erschienen als vollkommene Rotationskörper ohne jede bemerkbare Asymmetrie. Die folgende Tabelle 9, in welcher r_1 den vorderen, r_2 den hinteren Krümmungsradius bezeichnet, gibt eine Zusammenstellung der Messungsresultate:

Tabelle 9.

Linse	r_1	r_2
	Mm.	Mm.
I	14,02	10,85
II	14,10	9,89
III	14,45	9,95
IV	14,59	10,23
V	15,51	9,95
VI	16,15	10,40
Mittel	14,80	10,23

Matthiessen [2]) fand:

$r_1 = 13{,}75$ Mm.; $r_2 = 10{,}25$ Mm.

Die Messungen, welche Max Peschel [3]) mit einem von Meierstein construirten Helmholtz'schen Ophthalmometer an vier Rindslinsen anstellte, ergaben im Mittel:

$r_1 = 14{,}653$ Mm.; $r_2 = 9{,}567$ Mm.

III. Die continuirlich geschichtete Krystalllinse.

Die geschichtete Krystalllinse, dieses so eigenthümliche und ophthalmologisch höchst wichtige Gebilde des Vertebratenauges,

1) Matthiessen, Grundriss der Dioptrik etc. S. 184.

2) Ebenda S. 178. — Derselbe, Die Differentialgleichungen etc. S. 584.

3) Max Peschel, Experimentelle Untersuchungen über die Periskopie der Krystalllinse. Pflüger's Archiv f. d. gesammte Physiologie. XX. Bd. S. 338.

hat schon lange die Aufmerksamkeit der Forscher im besonderen Maasse in Anspruch genommen. Schon Petit[1]), welcher vielfache Augenuntersuchungen angestellt hat, machte die Bemerkung, dass die Linse aus einem mit schleimiger Substanz umgebenen dichteren Kern bestehe und bei allen Individuen mit den Jahren an Festigkeit zunehme. Porterfield[2]) hat bereits eine Erklärung für die dioptrische Bedeutung der dichteren Kernsubstanz gegeben. Wir lassen einen Passus aus Fischer's Geschichte der Physik, welcher diesen Gegenstand behandelt, wörtlich folgen. Im vierten Bande dieses Werkes S. 630 findet sich darüber Nachstehendes: „Die Lichtstrahlen, sagt er (sc. Porterfield), welche zunächst dem Rande derselben (Linse) auffallen, werden wegen der grösseren Schiefe stärker gebrochen, als diejenigen, welche um die Mitte näher bei der Axe eintreffen. Darum wird der Vereinigungspunkt der letzteren entfernter sein, als der ersteren, so dass sie unmöglich alle auf einem Punkte der Netzhaut, wie es zum deutlichen Sehen erfordert wird, zusammenkommen können. Die daraus entstehende Undeutlichkeit zu vermeiden, ist die Linse in der Mitte dichter und fester angeordnet, damit die nahe bei der Axe auffallenden Strahlen, wegen der stärkeren Brechung in diesem Kern, nach einem näheren Punkte hinter der Linse hin gebrochen werden und sich mit den anderen Strahlen, welche um den Rand herum auffallen, vereinigen mögen. Die Fische haben in ihrer krystallenen Feuchtigkeit einen weit dichteren Kern, als die Landthiere, weil sie bei ihnen fast kugelrund ist und die Vereinigungspunkte der nahe bei der Axe und am Rande auffallenden Strahlen weit mehr von einander abweichen würden, als bei den Landthieren, die eine linsenförmige krystallene Feuchtigkeit haben."

Wenn nun auch diese Erklärung dem heutigen Standpunkte der Wissenschaft bei Weitem nicht mehr als vollständig genügen kann, so zeigt sie doch, dass eine höchst wichtige Eigenschaft der Krystalllinse, ihr Aplanatismus, schon von Porterfield im Jahre 1759 richtig erkannt war.

Von ausserordentlicher Bedeutung für die lichtbrechende Kraft der Krystalllinse ist bekanntlich die continuirliche Zunahme der Brechungsindices von der Rinde bis zum Kerncentrum. Senff[3]),

1) Histoire de l'Acad. roy. de Paris. 1730.

2) William Porterfield, A treatise on the eye, the manner and phenomena of vision. Vol. I. S. 439. Edinburg 1759.

3) Volkmann, Art. Sehen. Handwörterbuch der Physiologie. III. 1. S. 290.

v. Zehender, v. Helmholtz und Andere haben theoretisch und experimentell festgestellt, dass die Linse in Folge dieser Structur eine grössere lichtbrechende Kraft besitzt, als wenn sie homogen wäre und ganz und gar aus Kernsubstanz gebildet würde.[1]) Dieses Brechungsvermögen nannte man totales oder imaginäres Brechungsvermögen. Matthiessen[2]) hat gezeigt, dass der Totalindex einer Linse genau so viel grösser ist als der Index des Kernes, um wie viel dieser an Brechungsvermögen die äusserste Rindensubstanz übertrifft.

Senff und v. Zehender[3]) haben die Cardinalpunkte der Krystalllinse durch Näherungsmethoden berechnet, indem sie mehrere homogene Schichten annahmen, deren Brechungsindices von der Rinde bis zum Kern hin grösser wurden. Es ist leicht einzusehen, dass diese ausserdem höchst zeitraubenden Methoden nur Näherungswerthe liefern können, welche um so ungenauer ausfallen, je weniger Schichten man bei der Rechnung angenommen hat. In neuester Zeit hat nun L. Matthiessen auf Grund seines Gesetzes über die continuirliche Zunahme der Brechungsindices von der äussersten Corticalschicht der Linse bis zu deren Kern eine Integrationsmethode entwickelt, welche es gestattet, die Lage der Cardinalpunkte der Krystalllinse höchst genau zu berechnen. Das Gesetz der Brechungsindices lautet[4]):

$$N = N_m - a\left(\frac{y}{b}\right)^2$$

Hierin bezeichnet die Variable y den Abstand einer beliebigen Schicht vom Kerncentrum der Krystalllinse, N den absoluten Brechungsindex dieser Schicht, a eine Constante, welche gleich $N_m - N_o$, das ist gleich der Differenz aus dem Kernindex und dem Index der äussersten Schicht, b die Entfernung der Rinde vom Kerncentrum.

Aus dieser Formel lässt sich also der absolute Brechungsindex irgend einer beliebigen Linsenschicht, deren Entfernung vom Kern gleich y, leicht berechnen, wenn man die Indices der Rinde und des Kerncentrums und ausserdem den Abstand des Kerns von der Rinde kennt. Matthiessen wurde auf dieses Gesetz durch genauere Betrachtung einer Beobachtungsreihe von

1) Vergl. Aubert, Physiologische Optik. S. 410. — Matthiessen, Grundriss der Dioptrik etc. S. 171 u. 177.

2) Matthiessen, Die Differentialgleichungen etc. § 3 u. 4.

3) W. v. Zehender, Anleitung zum Studium d. Dioptrik d. Auges. 1856.

4) L. Matthiessen, Grundriss der Dioptrik etc. § 52.

Chossat geführt, welcher an einer Elephantenlinse die Brechungsindices von neun Schichten bestimmt hatte. Chossat selbst war vergeblich bemüht, aus seinen Messungen ein Gesetz abzuleiten. Zur weiteren Begründung seiner Ansicht stellte Matthiessen mittelst des grossen Abbe'schen Refractometers zahlreiche Untersuchungen an Rindslinsen an und fand sein Gesetz überraschend bestätigt. Wir haben diese Untersuchungen mit grösster Sorgfalt wiederholt und Resultate gefunden, welche uns eine unumstössliche Gewissheit von der Richtigkeit der Matthiessen'schen Formel verschafften. Diese Arbeiten waren äusserst schwierig und oft mussten angefangene Untersuchungsreihen abgebrochen und ihre Resultate als nutzlos beiseite geworfen werden, weil unvorhergesehene Umstände die Richtigkeit der Messungen in höchst störender Weise beeinflusst hatten. So wirkte vor Allem die Verdunstung auf die Linsensubstanz, welche höchstens in Mengen von der Grösse eines Stecknadelknopfes benutzt werden konnte, oft derartig ein, dass deren Brechungsindex innerhalb 30—40 Secunden schon in der zweiten Decimale um eine Einheit gestiegen war. Es mussten demnach die Messungen mit dem grossen Abbe'schen Refractometer an Tagen von hohem relativen Feuchtigkeitsgehalt der Luft vorgenommen werden. Ferner war darauf zu sehen, dass die zu untersuchende Probe nach ihrer Entnahme von der Linse möglichst schnell in das Instrument gebracht wurde. Die Masse konnte dann mit dem unteren losen Prisma so lange verrieben werden, bis sich eine scharfe Abgrenzungslinie zeigte. Die Linse wurde, auf einer Korkplatte liegend, in der Richtung der Axe mit einem scharfen Messer halbirt. Weil dieser Schnitt nur selten genau mit der Axe zusammenfallen konnte, so wurde von den beiden Linsenhälften nur diejenige zu den Messungen benutzt, deren Kernprobe den grössten Index zeigte. Um eine Verdunstung an der Schnittfläche thunlichst zu vermeiden, wurde die Linse unter ein mit nassem Fliesspapier ausgekleidetes Bechergläschen gestellt. Dieses durfte stets nur so lange entfernt werden, als nöthig war, um eine Probe von der Linse zu entnehmen. Der Durchmesser der Krystalllinse wurde mit Hülfe eines Cirkels genau in zwölf gleiche Theile getheilt. Der mittelste Theilpunkt musste in das Kerncentrum fallen. Nun wurden vermittelst einer feinen Messerspitze Proben von den Theilpunkten entnommen und deren Indices durch mehrfache Beobachtungen gemessen. Aus den Resultaten, welche zwei zu beiden Seiten des Kerns gelegene und gleich weit von demselben entfernte Punkte

ergaben, wurde das Mittel gezogen. Auf diese Weise konnten die Fehler annähernd compensirt werden, welche sich in Folge der nicht vollkommen genauen Eintheilung des Linsendurchmessers nothwendig ergeben mussten. Die Tabelle 10 enthält die Durchschnittsresultate aus circa 200 Einzelbeobachtungen. Die durch Messung gefundenen Indices sind den nach der Matthiessenschen Formel berechneten Werthen gegenüber gestellt. Die Bedeutung der Columnen wird aus dem Vorhergehenden bekannt sein.

Tabelle 10.

$\frac{y}{b}$	Linse I $n =$	Linse II $n =$	Linse III $n =$	Linse IV $n =$	Mittel $n =$	ber. Index $n =$
$\frac{0}{6}$	1,4460	1,4654	1,4657	1,4669	1,4660	1,4660
$\frac{1}{6}$	1,4635	1,4630	1,4628	1,4637	1,4632	1,4638
$\frac{2}{6}$	1,4585	1,4557	1,4550	1,4560	1,4563	1,4573
$\frac{3}{6}$	1,4468	1,4449	1,4452	1,4455	1,4456	1,4463
$\frac{4}{6}$	1,4345	1,4294	1,4319	1,4337	1,4324	1,4310
$\frac{5}{6}$	1,4101	1,4089	1,4090	1,4125	1,4101	1,4113
$\frac{6}{6}$	1,3850	1,3892	1,3879	1,3865	1,3872	1,3872

Diese Tabelle bestätigt nur die Gültigkeit des Gesetzes in der Richtung des Durchmessers der Linse. Für die Axe waren diese Untersuchungen ungleich schwieriger, weil sich hier die nöthige Anzahl Theilpunkte nicht mit derselben Genauigkeit feststellen liess. Es wurden deswegen ausser von dem Kerncentrum und der vorderen und hinteren Rindensubstanz nur noch von den Halbirungspunkten des vorderen und des hinteren Theils der Axe Proben zur Untersuchung entnommen. Der Vergleich der Messungs- mit den Rechnungsresultaten fiel auch in diesem Falle, wie aus Tabelle 11 ersichtlich, vollkommen zufriedenstellend aus. Diese Tabelle zeigt zugleich, dass die Brechungsindices der äussersten Schicht vorn, hinten und am Rande der Linse nur wenig von einander differiren.

In Tabelle 11 bezeichnen b_1 den vorderen, b_2 den hinteren Theil der Axe und b_3 den halben Durchmesser.

Tabelle 11.

y	Linse V $n =$	Linse VI $n =$	Linse VII $n =$	Mittel $n =$	ber. Index $n =$
0	1,4648	1,4663	1,4638	1,4650	—
b_1	1,3794	1,3870	1,3868	1,3844	—
b_2	1,3819	1,3856	1,3873	1,3849	—
b_3	1,3809	1,3844	1,3858	1,3837	—
$\frac{b_1}{2}$	1,4447	1,4435	1,4422	1,4435	1,4448
$\frac{b_2}{2}$	1,4477	1,4480	1,4430	1,4462	1,4450

Zur Berechnung des Totalindex hat Matthiessen mit Hülfe seiner Integrationsmethode folgende Formel entwickelt, welche für die ungleichseitige Linse gilt[1]):

$$n = 1 + 2\,\zeta - {}^2/_3\,\zeta^2\,\frac{b_1 r_2^2 + b_2 r_1^2}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)} + 2\,\zeta^2\,\frac{b_1 + b_2}{r_1 + r_2}$$

Hierin ist $\zeta = \frac{1{,}4655 - 1{,}3853}{1{,}3853} = 0{,}0579$, $r_1 = 14{,}80$, $r_2 = 10{,}23$, $b_1 = 5{,}5$, $b_2 = 6{,}5$ für unsern Fall zu setzen. Die Rechnung ergab: $n = 1{,}5485$.

Senff[2]) fand durch Rechnung den Totalindex einer Ochsenlinse gleich 1,541. Dieses Resultat stimmte mit einer directen Messung desselben, welche $n = 1{,}539$ ergab, ziemlich genau überein. Max Peschel[3]) bestimmte an vier Rindslinsen durch Messungen die Totalindices und fand:

Linse I	Linse II	Linse III	Linse IV
$n = 1{,}5364$	$n = 1{,}5272$	$n = 1{,}5372$	$n = 1{,}5413$

Um auch über die Form der Zellschichtung der Krystalllinse einigen Aufschluss zu erlangen, wurden nach eigener Methode mehrere Präparate angefertigt, von denen eins in Fig. 5 nach einer vergrösserten Photographie dargestellt ist und welches im Allgemeinen den Verlauf der Zellschichten erkennen lässt.[4]) Messungen an diesen Präparaten anzustellen, schien uns nicht thunlich, da die durch Risse in der Linsensubstanz gebildeten Curven nicht continuirlich genug verlaufen.

---

1) Vergl. Matthiessen, Die Differentialgleichungen etc. S. 503.

2) Matthiessen, Grundriss der Dioptrik etc. S. 177. — Derselbe, Die Differentialgleichungen etc. S. 492. — Aubert, Physiol. Optik. S. 410.

3) Peschel, Experimentelle Untersuchungen etc. Pflüger's Archiv. XX. Bd. S. 345 u. 346.

4) Vergl. Leuckart, Organologie des Auges. S. 260.

Das vorliegende Präparat wurde auf folgende Weise dargestellt: Um der Linse ihre ursprüngliche Form, welche bei allen Härtungsmethoden mehr oder weniger verloren geht, möglichst zu erhalten, wurde dieselbe in Gyps eingegossen und nach dessen Erhärtung mit dieser Umhüllung einige Minuten in Wasser gekocht, bis ihre Substanz geronnen war. Hierauf wurde die Gypsmasse vorsichtig zerbrochen und die Linse circa 24 Stunden lang mit absolutem Alkohol behandelt. Nachdem auf diese Weise alles Wasser thunlichst aus den Zellen entfernt war, legte man die Linse in eine Auflösung von Mastix in Alkohol, in welcher sie ebenfalls circa 24 Stunden verblieb. Hierauf wurde die Linse getrocknet und dann mit einer feinen Säge vorsichtig in der

Fig. 5.

Richtung der Axe halbirt. Um eine gleichmässige Schnittfläche herzustellen, musste das Präparat auf einem glatten Schleifsteine geschliffen werden. Nachdem dies geschehen, wurde die Linse wiederum mit Alkohol behandelt. Beim Trocknen der Linse an der Luft zeigten sich jetzt in Folge der Lostrennung der Zellschichten von einander Risse, welche durch Färbungsmethoden und wiederholtes Abschleifen der Schnittfläche deutlicher sichtbar gemacht wurden. Zum Schluss wurde das Präparat, um ein Schrumpfen zu vermeiden, längere Zeit in Lack gelegt und darauf vollständig getrocknet.

IV. Berechnung der Cardinalpunkte des Rindsauges.

Tabelle der geometrischen und dioptrischen Constanten des Rindsauges.

Gemessene Objecte.	Matthiessen	Moennich
	Mm.	Mm.
Krümmungsradius der vorderen Hornhautfläche . .	18,00	15,18
= = = Linsenfläche . . .	13,75	14,80
= = hinteren = . . .	10,25	10,23
Axe der Krystalllinse	12,00	12,00
Durchmesser der Krystalllinse	17,75	18,37
Vorderer Theil der Linsenaxe	4,50	5,50
Hinterer = = = ...	7,50	6,50
Ort der vorderen Linsenfläche	5,00	5,40
Ort der hinteren Linsenfläche	17,00	17,40
Ort der Retina.	34,00	35,285
Innerer Verticaldurchmesser des Auges	38,00	39,10
Brechungsindex des dest. Wassers n_D bei 15° C. . .	—	1,3340
= der Hornhaut	1,3785	1,3757
= des Kammerwassers	1,3351	1,3363
= des Glaskörpers	1,3348	1,3359
= der vorderen Linsenkapsel	1,3784	1,3792
= der hinteren = ...	1,3816	1,3819
= der äussersten Linsenschicht vorn .	1,3832	1,3851
= = = = hinten .	1,3850	1,3855
= des Kerncentrums	1,4714	1,4656

In den folgenden Formeln bezeichnen immer: f die negativen, φ die positiven Brennweiten, a_1 die ersten, a_2 die zweiten Hauptpunktsdistanzen.

1. Das Hornhautsystem.

Die Formeln zur Berechnung der Brennweiten des Hornhautsystems sind:

$$f = \frac{-r}{n-1}; \qquad \varphi = r - f$$

worin $r = 15{,}18$ und $n = 1{,}3360$ zu setzen ist. Es wurde erhalten:

$$f = -45{,}178 \text{ Mm.}; \qquad \varphi = 60{,}358 \text{ Mm.}$$

2. Das Linsensystem.

Die Berechnung der Cardinalpunkte der Krystalllinse geschah mit Hülfe der Formeln [1]), welche Matthiessen auf Grund seiner Integrationsmethode für die ungleichseitige Linse entwickelt hat, auf folgende Weise:

1) Matthiessen, Die Differentialgleichungen etc. S. 501.

a) Es wurden die Haupt- und Brennpunkte der vorderen Linsenhälfte unter der Voraussetzung berechnet, dass sich vor derselben Cortical- und hinter derselben Kernsubstanz befände. Diese Hälfte wurde dann mit dem Kammerwasser combinirt.

b) Wir berechneten die Haupt- und Brennpunkte der hinteren Linsenhälfte für die Annahme, dass vor derselben Kernsubstanz und hinter derselben Corticalsubstanz befindlich, und combinirten dann diese Hälfte mit dem Glaskörper.

c) Aus der Combination der beiden unter a und b berechneten Systeme ergaben sich die Cardinalpunkte der ganzen Krystalllinse.

Zur numerischen Berechnung dienten folgende Daten, deren Bedeutung aus dem Vorhergehenden bekannt ist:

$r_1 = 14{,}80$ Mm.; $r_2 = 10{,}23$ Mm.;
$b_1 = 5{,}5$ Mm.; $b_2 = 6{,}5$ Mm.;

$$\zeta = \frac{1{,}4655 - 1{,}3853}{1{,}3853} = 0{,}0579.$$

a) Die vordere Linsenhälfte. Die Formeln sind:

$$f_1 = \frac{-r_1}{n_1 - 1}; \qquad \varphi_1 = r_1 - f_1.$$

Hierin ist $n_1 = \frac{1{,}3853}{1{,}3360} = 1{,}03688$

$$f_2 = \frac{-r_1}{2\zeta\left(1 - \frac{1}{3}\zeta\frac{b_1}{r_1}\right)}; \qquad \varphi_2 = -(1+\zeta)f_2$$

$$-a_1' = \frac{1}{2}b_1\left(1 - \frac{1}{2}\zeta + \frac{1}{6}\zeta\frac{b_1}{r_1}\right)$$

$$a_2' = \frac{1}{2}b_1\left(1 + \frac{1}{6}\zeta + \frac{1}{6}\zeta\frac{b_1}{r_1}\right)$$

Das Interstitium ist:

$$\varepsilon = b_1 - (-a_1' + a_2').$$

Die Rechnung ergab:

$f_1 = -401{,}3$ Mm.; $\varphi_1 = 416{,}10$ Mm.;
$f_2 = -128{,}73$ Mm.; $\varphi_2 = 136{,}18$ Mm.;
$-a_1' = 2{,}6804$ Mm.; $a_2' = 2{,}7862$ Mm.;
$\varepsilon = 0{,}0334$ Mm.

Hieraus ergeben sich die Hauptbrennweiten und Hauptpunktsdistanzen der mit dem Kammerwasser combinirten vorderen Linsenhälfte nach folgenden bekannten Formeln:

$$\left.\begin{aligned} f &= \frac{f_1 f_2}{f_2 - \varphi_1 + D}; & \varphi &= \frac{-\varphi_1 \varphi_2}{f_2 - \varphi_1 + D} \\ -a_1 &= \frac{f D}{f_2}; & a_2 &= \frac{\varphi D}{\varphi_1} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (5)$$

worin $D = -a_1' = 2{,}6804$ Mm. zu setzen ist. Es wurde gefunden:

$f = -95{,}326$ Mm; $\varphi = 104{,}507$ Mm.;
$-a_1 = 1{,}9848$ Mm.; $a_2 = 0{,}6732$ Mm.

Die Oerter der beiden Hauptpunkte $H_{1,1}$ und $H_{2,1}$ auf den Scheitel S_1 der Vorderfläche resp. auf das Kerncentrum M bezogen, ergibt:

$H_{1,1}\, S_1 = 1{,}9848$ Mm. $= -a_1$
$H_{2,1}\, M = a_2' + a_2 = 3{,}4574$ Mm.
$\varepsilon = b_1 - (H_{1,1}\, S_1 + H_{2,1}\, M) = 0{,}0578$ Mm.

b) Die hintere Linsenhälfte. Die Formeln sind:

$$f_1 = -(1+\zeta)\varphi_1; \qquad \varphi_1 = \frac{r_2}{2\zeta\left(1 - \frac{1}{3}\zeta\frac{b_2}{r_2}\right)}$$

$$f_2 = r_2 - \varphi_2; \qquad \varphi_2 = \frac{r_2}{n_1 - 1}$$

$$-a_1'' = \frac{1}{2} b_2 \left(1 + \frac{1}{6}\zeta + \frac{1}{6}\zeta\frac{b_2}{r_2}\right)$$

$$a_2'' = \frac{1}{2} b_2 \left(1 - \frac{1}{2}\zeta + \frac{1}{6}\zeta\frac{b_2}{r_2}\right)$$

$$\varepsilon = b_2 - (-a_1'' + a_2'').$$

Es wurden durch Rechnung erhalten:

$f_1 = -94{,}62$ Mm.; $\varphi_1 = 89{,}44$ Mm.;
$f_2 = -287{,}62$ Mm.; $\varphi_2 = 277{,}39$ Mm.;
$-a_1'' = 3{,}3009$ Mm.; $a_2'' = 3{,}1759$ Mm.;
$\varepsilon = 0{,}0232$ Mm.

Die Hauptpunktsdistanzen und Hauptbrennweiten der mit dem Glaskörper combinirten hinteren Linsenhälfte ergeben sich aus den Formeln (5). Hierin ist $D = a_2'' = 3{,}1759$ Mm. zu setzen. Man erhielt:

$f = -72{,}788$ Mm.; $\varphi = 66{,}356$ Mm.;
$-a_1 = 0{,}8037$ Mm.; $a_2 = 2{,}3562$ Mm.

Wenn man nun die Oerter der Hauptpunkte $H_{1,2}$ und $H_{2,2}$ auf das Kerncentrum M resp. den Scheitel S_2 der hinteren Linsenfläche bezieht, so ergibt sich:

$H_{1,2}\, M = -(a_1 + a_1'') = 4{,}1046$ Mm.
$H_{2,2}\, S_2 = a_2 = 2{,}3562$ Mm.
$\varepsilon = b_2 - (H_{1,2}\, M + H_{2,2}\, S_2) = 0{,}0392$ Mm.

c) Das ganze Linsensystem. Die im Vorhergehenden berechneten dioptrischen Elemente sind:

$f_1 = -95{,}326$ Mm.; $\varphi_1 = 104{,}507$ Mm.
$f_2 = -72{,}788$ Mm.; $\varphi_2 = 66{,}356$ Mm.

Auf Grund dieser Daten ergeben sich aus den Formeln (5), worin $D = H_{2,1} M + H_{1,2} M = 7{,}562$ Mm. zu setzen ist, folgende Werthe der Hauptbrennweiten und Hauptpunktsdistanzen:

$f = -\varphi = -40{,}88$ Mm.
$-a_3 = 4{,}2471$ Mm.; $a_4 = 2{,}9858$ Mm.

Bezeichnet man nun die beiden Hauptpunkte der Linse mit H_α und H_β und bezieht dieselben auf den vorderen resp. hinteren Linsenscheitel, so ist:

$H_\alpha S_1 = H_{1,1} S_1 - a_3 = 6{,}2319$ Mm.
$H_\beta S_2 = H_{2,2} S_2 + a_4 = 5{,}3142$ Mm.
$\varepsilon = b_1 + b_2 - (H_\alpha S_1 + H_\beta S_2) = 0{,}4539$ Mm.

3. Das ganze Auge.

Die Cardinalpunkte des ganzen Auges ergeben sich aus der Combination des Hornhautsystems mit dem Linsensystem. Diese geschieht mit Hülfe der Formeln (5) auf Grund der Daten:

$f_1 = -45{,}178$ Mm.; $\varphi_1 = 60{,}358$ Mm.
$f_2 = -40{,}88$ Mm.; $\varphi_2 = 40{,}88$ Mm.

D ist in diesem Falle gleich dem Abstand des vorderen Scheitels S_h der Cornea vom ersten Hauptpunkt H_α des Linsensystems, also:

$D = 5{,}4$ Mm. $+ 6{,}2319$ Mm. $= 11{,}6319$ Mm.

Man findet die Hauptbrennweiten und Hauptpunktsdistanzen des ganzen Auges:

$f = -20{,}611$ Mm.; $\varphi = 27{,}537$ Mm.
$-a_1 = 5{,}8646$ Mm.; $a_2 = 5{,}3066$ Mm.

Bezieht man nun die Oerter der beiden Hauptpunkte und der beiden Brennpunkte auf den Scheitel S_h der Cornea, so ergibt sich:

$H_1 S_h = -a_1 = 5{,}8646$ Mm.
$H_2 S_h = -(a_2 + H_\beta S_2) + 17{,}4 = 6{,}7792$ Mm.
$\varepsilon = 0{,}9146$ Mm.
$F = f + H_1 S_h = -14{,}7464$ Mm.
$\Phi = \varphi + H_2 S_h = 34{,}316$ Mm.

Der Ort der Retina wurde durch Messung gefunden gleich 35,285 Mm. Es ergibt sich also für das Rindsauge eine Myopie von 0,969 Mm. Wir nehmen das todte Auge als für die Ferne

accommodirt an und finden den Abstand des Fernpunktes vom vorderen Brennpunkt aus der Brennpunktscoordinatenformel:

$$\xi\,\xi_1 = \varphi f.$$

Die Zahlenwerthe eingesetzt, resultirt:

$$\xi = \frac{-20{,}611 \times 27{,}537}{0{,}969} = -585{,}71 \text{ Mm.}$$

Dies ergibt eine Myopie von 1,707 Dioptrien.

Den Ort des ersten Knotenpunktes findet man aus der Formel:

$$K_1 = \Phi - H_2 + F.$$

Die Zahlenwerthe substituirt, gibt:

$$K_1 = 34{,}316 - 6{,}7792 - 14{,}7464 = 12{,}7904 \text{ Mm.}$$

Der Ort des zweiten Knotenpunktes ist:

$$K_2 = K_1 + \varepsilon$$

woraus folgt:

$$K_2 = 12{,}7904 + 0{,}9146 = 13{,}7050 \text{ Mm.}$$

Tabelle der Cardinalpunkte des Rindsauges in der Accommodation für die Ferne.

Cardinalpunkte	Matthiessen	Moennich
	Mm.	Mm.
F	— 14,3897	— 14,7464
H_1	5,8816	5,8646
H_2	7,1223	6,7792
K_1	(12,6726)	12,7904
K_2	(13,9133)	13,7050
Φ	34,1846	34,3160
ε	1,2407	0,9146

Fig. 6.

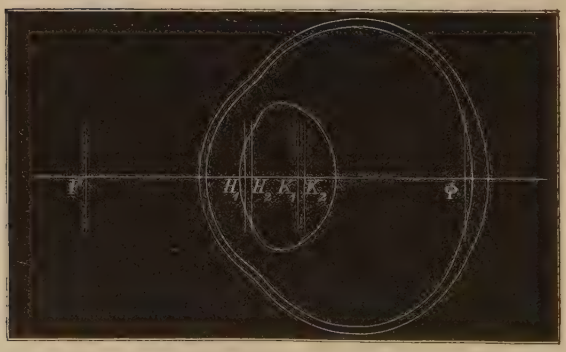


Fig. 6 stellt einen Sagittalschnitt des Rindsauges in natürlicher Grösse dar und veranschaulicht die Lage der Cardinalpunkte.

Mit Hülfe der Daten der vorstehenden Tabelle lassen sich leicht die Maasse des reducirten Rindsauges berechnen. Man nimmt bei dem reducirten Auge bekanntlich nur einen einzigen Hauptpunkt und einen einzigen Knotenpunkt an. Die lichtbrechenden Medien des Auges müssen in Folge dieser Annahme homogen und von einer einfachen brechenden Fläche begrenzt gedacht werden. Der Knotenpunkt coincidirt dann mit dem Krümmungsmittelpunkte dieser Fläche, während der Hauptpunkt in dem Scheitelpunkt derselben liegt. Der Radius der Begrenzungsfläche ist demnach:

$$r = K_1 - H_1 = 6{,}9258 \text{ Mm.}$$

Runden wir dieses ab auf

$$r = 7 \text{ Mm.}$$

und setzen $n = \frac{4}{3}$,

so finden wir als Brennweiten des reducirten Auges:

$$F_r = \frac{-r}{n-1} = \frac{-7}{\frac{4}{3}-1} = -21 \text{ Mm.}$$

$$\Phi_r = \frac{nr}{n-1} = \frac{\frac{4}{3}7}{\frac{4}{3}-1} = 28 \text{ Mm.}$$

Die für das durchschnittliche Rindsauge gefundene, ziemlich hochgradige Myopie von 1,707 Dioptrien widerstreitet allerdings der Ansicht einiger Forscher [1]), nach welcher sämmtliche Hausthiere, ja vielleicht alle Wirbelthiere hypermetropisch sein sollen, gewinnt aber an Wahrscheinlichkeit, wenn man die Lebensweise der Rinder hier zu Lande berücksichtigt. Bei uns verbleiben nämlich diese Thiere den grössten Theil des Jahres im Stallgebäude und gelangen auf einzelnen Landgütern, wo Stallfütterung betrieben wird, während ihrer Lebensdauer überhaupt nur selten auf kurze Zeit ins Freie. Wenn man nun in Erwägung zieht, dass die Rinder, im Stalle angekettet, nur nahe gelegene Gegenstände vor sich haben, welche sie mit ihren Augen fixiren können und ausserdem selten Gelegenheit finden, ihr Auge für Objecte in grösserer Ferne zu accommodiren, so wird die Entwickelung einer hochgradigen Myopie sich als äusserst wahr-

1) Berlin, Ueber den physikalisch-optischen Bau des Pferdeauges. Zeitschr. f. vergl. Augenheilkunde. 1882. S. 27. — Mauthner, Vorlesungen über die optischen Fehler des Auges. 1876. S. 463.

scheinliche Consequenz ergeben müssen. Berlin[1]) hat bei dem Pferdeauge eine Hypermetropie constatirt. Auch dieses Resultat erscheint vollständig zutreffend, wenn die Lebensweise der Pferde in Betracht gezogen wird. Der bei Weitem grössere Theil dieser Thiere verbringt eine beträchtliche Zeit des Lebens im Freien, wodurch vielfache Anregung zur Accommodation des Auges für entferntere Gegenstände geboten wird. Dazu kommt noch ein anderer Umstand, welcher ins Gewicht fällt, nämlich der, dass das Pferd vielfach schwere krafterschöpfende Arbeit verrichten muss. Diese andauernde Anstrengung, deren Folge eine allgemeine Erschlaffung, scheint auch einerseits die Thätigkeit des Ciliarmuskels zu beeinträchtigen, andererseits aber eine Apathie des Thieres gegen seine Umgebung zu erzeugen, wodurch das Auge veranlasst wird, im accommodationslosen Zustande zu verharren. Dass sich in Folge dessen mit der Zeit eine Hypermetropie herausbilden müsse, scheint kein allzu gewagter Schluss zu sein. Das häufig beobachtete theilnahmlose Vorsichhinstarren durch Arbeit ermatteter Pferde bildet eine nicht zu unterschätzende Stütze für diese Annahme.

Die experimentellen Grundlagen vorstehender Untersuchungen wurden zum Theil im physikalischen Institute der Landesuniversität gewonnen. Es möge mir gestattet sein, an dieser Stelle meinem verehrten Lehrer, dem Herrn Professor Dr. L. Matthiessen, meinen herzlichsten Dank auszusprechen für seine dieser Arbeit gewährte anregende Theilnahme und die mir dabei bereitwilligst ertheilten Rathschläge.

Rostock, im Februar 1883.

---

1) Berlin, Ueber den physikalisch-optischen Bau des Pferdeauges. Zeitschr. f. vergl. Augenheilkunde. 1882. S. 27.